Sistema electromagnético a 60 y 120 Hz para germinación de semillas de *Capsicum annuum L.*

Electromagnetic system at 60 and 120 Hz for *Capsicum annuum L.* seed germination

Cesar Gerardo Parra[1], Eros G. Ramos Rodríguez[1], Rodrigo A. Torres[1], Gloria F. Soto Vega[1], David E. Castro Palazuelos[1], Julio C. Picos Ponce[1].

[1]Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, División de estudios de posgrado e investigación, cesar.gp@culiacan.tecnm.mx

Resumen

El campo electromagnético es un fenómeno eléctrico presente en dispositivos electrónicos, en la transmisión de energía y en aplicaciones médicas. En los últimos años, su uso en la agricultura recibe mayor atención, en específico en estudios a la escala laboratorio, con semillas de maíz, tomate, soya y en este estudio de chile serrano (Capsicum Annuum L.). El estado de Sinaloa destaca a nivel nacional por su producción agrícola, apoyado por sus condiciones geográficas favorables. En este trabajo se analiza el efecto de la exposición a un campo electromagnético variable en semillas de chile serrano. A diferencia de trabajos previos, donde se emplea una sola frecuencia o un único tiempo de exposición, aquí se evalúan dos frecuencias (60 y 120 Hz) y tres tiempos de tratamiento (10, 30 y 60 minutos). Los resultados muestran que la aplicación del campo electromagnético favorece la germinación y el desarrollo inicial de las plántulas. Se observa una mejora en características como color, altura y número de hojas, en comparación con las semillas sin tratamiento. Estos resultados sugieren que la exposición a campos electromagnéticos puede representar una alternativa para mejorar la eficiencia agrícola.

Palabras clave: Campo electromagnético, frecuencia, estimulación.

Abstract

The electromagnetic field is a physical phenomenon present in electronic devices, power transmission systems, and medical applications. In recent years, its use in agriculture has received increasing attention, particularly in laboratory-scale studies with maize, tomato, and soybean seeds, as well as, in this study, serrano pepper (Capsicum annuum L.) seeds. The state of Sinaloa stands out nationally for its agricultural production, supported by favorable geographical conditions. This work analyzes the effect of exposure to a variable electromagnetic field on serrano pepper seeds. Unlike previous studies that employ only one frequency or a single exposure time, this study evaluates two frequencies (60 and 120 Hz) and three exposure times (10, 30, and 60 minutes). The results show that the application of the electromagnetic field favors germination and the initial development of seedlings. Improvements are observed in characteristics such as color, height, and number of leaves, compared with untreated seeds. These findings suggest that exposure to electromagnetic fields may represent an alternative approach to improving agricultural efficiency.

Keywords: *Electromagnetic field, frequency, stimulation.*

Recibido: 01/12/2025; Publicado 30/12/2025

Introducción

México, por su diversidad geográfica y climática, es un país donde la actividad agrícola constituye un pilar fundamental para la economía y la sociedad, además de su impacto en el comercio internacional. La agricultura resulta indispensable para el desarrollo nacional. México se posiciona como uno de los principales productores y exportadores de productos agrícolas en el mundo, donde se destacan frutas, verduras y hortalizas.

De acuerdo con el Panorama Agroalimentario 2018-2024, México ocupa el segundo lugar a nivel mundial en la producción de chile verde, solo por detrás de China. A nivel nacional, el estado de Sinaloa se sitúa en el segundo lugar en la producción de este cultivo, después de Chihuahua. Aunque Chihuahua lidera el volumen nacional de producción de chile, los productores sinaloenses registran mayores ingresos económicos [1].

La agricultura en Sinaloa es una de las principales actividades económicas del estado. Con una superficie de riego cercana a 750 mil hectáreas y más de un millón de hectáreas de temporal, Sinaloa ocupa los primeros lugares a nivel nacional en la producción de granos y distintos tipos de hortalizas [2].

Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) para el año 2023, Sinaloa se coloca en el tercer lugar nacional en valor de producción agrícola, con 80,187 millones de pesos. Entre los cultivos más importantes se encuentra el chile verde, con una producción de 813,619 toneladas y un valor de 9,974 millones de pesos. Esto se aprecia en la figura 1 [3].

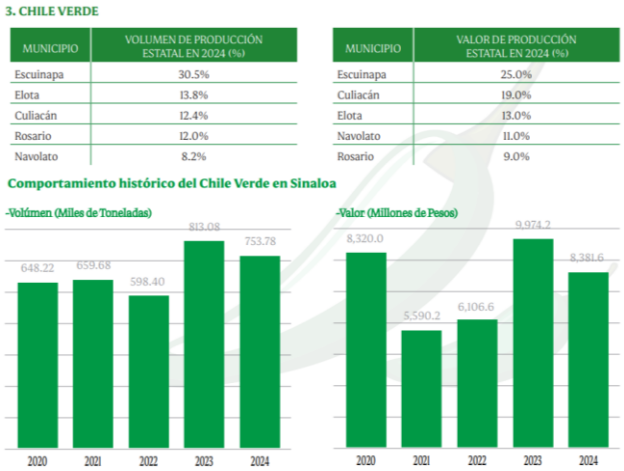


Figura 1. *Cuadros de volumen de producción estatal y graficas de comportamiento histórico del chile verde en Sinaloa. Fuente: Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Sinaloa [3].*

En México, el cultivo de chile serrano representa un reto constante debido a la alta susceptibilidad ante plagas, enfermedades y variaciones ambientes. Además, la semilla responde de forma sensible a la disponibilidad de humedad. El principal problema se presenta en la etapa de la germinación, la cual resulta irregular y prolongada, esto se traduce en un crecimiento lento y poco uniforme de las plantas [4].

Por ello, el desarrollo de tratamientos para estimular y mejorar la calidad, eficiencia y porcentaje de germinación de las semillas de chile serrano resulta de gran importancia. La aplicación de estos métodos puede incrementar el número de plantas viables, reducir el tiempo requerido para la germinación y, en consecuencia, aumentar la producción agrícola. Asimismo, la implementación de sistemas que se basan en campos electromagnéticos puede contribuir al desarrollo de nuevas técnicas agrícolas y establecer una base experimental para futuras investigaciones en otros cultivos.

Fundamentación Teórica

En la actualidad, el uso de la tecnología y métodos físicos para optimizar procesos agrícolas constituye un campo de estudio multidisciplinario. Un campo electromagnético se define como una región del espacio donde interactúan las propiedades eléctricas y magnéticas, estas en conjunto generan una fuerza sobre las cargas presentes. Este tipo de campo requiere la existencia de cargas en movimiento para su formación [5].

Para generar campos electromagnéticos de manera controlada en aplicaciones experimentales se emplea de forma habitual un electroimán. Este dispositivo consiste en un conductor enrollado en forma de solenoide, compuesto por varias espiras de alambre alrededor de un núcleo ferromagnético. Cuando circula corriente eléctrica a través del conductor, se induce un campo magnético cuya intensidad depende de la geometría de la bobina y de la permeabilidad del material del núcleo [6].

La aplicación de campos magnéticos a semillas se conoce como tratamiento presiembra, modifica procesos fisiológicos relacionados con su vigor. Entre los efectos reportados se encuentran una mayor absorción de agua y nutrientes, el incremento en la tasa de germinación y la mejora en el desarrollo inicial de las plántulas.

Diversas investigaciones respaldan el uso de esta técnica. Zepeda Bautista et al. (2019) analizan el efecto de un campo electromagnético variable sobre la calidad fisiológica del maíz (Zea mays). El estudio utiliza un solenoide energizado a 60 Hz, este genera un campo de 3.6 mT, aplicado a tres variedades de maíz con tiempos de exposición de 6, 12 y 24 minutos. Los resultados muestran una relación positiva entre el tiempo de exposición y el desarrollo del cultivo, se destaca el tratamiento de 24 minutos, este incrementa el crecimiento un 10.54 % y reduce en dos días el tiempo de establecimiento de plántulas respecto al grupo control. [7]

De manera complementaria, Carbonell Padrino, Martínez Ramírez y Flórez García (2013) evalúan campos magnéticos estacionarios de mayor intensidad en semillas de soya (*Glycine max L.*). Para ello se emplean imanes permanentes de material cerámico con geometría angular y tres intensidades de campo (125, 250 y 300 mT). Los tiempos de exposición considerados incluyen 10 y 20 minutos, así como 1, 24 horas y exposición permanente. Los resultados indican que los tratamientos de 10 minutos y 20 minutos en los tres niveles de intensidad aumentan de manera significativa la velocidad y el porcentaje de germinación [8].

Metodología

Como primer paso se fabrica el electroimán tipo solenoide, componente principal del sistema encargado de generar el campo electromagnético variable. Para su construcción se utiliza un tubo de PVC de ¾″ de diámetro y 15 cm de longitud, al cual se le realiza una pequeña muesca para sujetar el alambre de cobre esmaltado calibre 15 AWG. El enrollado se efectúa de un extremo al otro del tubo. Al completar la primera capa se aplica barniz dieléctrico, se deja secar y se envuelve con cinta de papel. Posteriormente se repite el proceso de bobinado y barnizado de forma consecutiva hasta alcanzar el número deseado de espiras.

Como núcleo se utiliza una varilla de hierro dulce, debido a sus propiedades de alta permeabilidad y su baja retentividad magnética, lo cual facilita la magnetización inmediata ante la presencia del campo magnético y evita la formación de un imán permanente al retirar la excitación magnética.

Figura 2. *Inductancia del electroimán con y sin núcleo de hierro dulce.*

De esta manera, al finalizar la construcción del electroimán este cuenta con 630 espiras. Presenta una inductancia de 1665 μH sin un núcleo activo, en cambio con la varilla de hierro dulce de 0.7 cm de diámetro, se aprecia un incremento en la inductancia de 2.35 mH, como se observa en la figura 2.

La alimentación del electroimán proviene de la red eléctrica con frecuencia nominal de 60 Hz. Para operar de forma segura se integra un transformador reductor con relación de 10:1, el cual entrega 12 V y 3 A en su salida. Entre el transformador y el electroimán se instala un fusible de 3 A como protección. La medición de corriente en operación indica un consumo de 2.204 A.

Con los parámetros establecidos, se calcula de forma teórica la densidad de flujo magnético mediante la ecs. (1):

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N}{L} I \tag{1}$$

donde:

- B = Densidad de flujo magnético.
- μ_0 = Permeabilidad del vacío ($4\pi x 10^{-7}\ T$).
- μ_r = Permeabilidad relativa del hierro dulce.
- N = Número de espiras del solenoide.
- L = Longitud del solenoide.
- I = Corriente que circula por el solenoide.

Sin embargo, μ_r representa la permeabilidad relativa de un núcleo ferromagnético ideal. En un solenoide real deben considerarse factores como: longitud finita del núcleo, presencia de huecos de aire, fuga de flujo magnético hacia el exterior, cercanía a la saturación y geometría no perfecta. Debido a ello, el campo magnético real resulta de la contribución conjunta del núcleo de hierro dulce y del aire circundante, por ende, la permeabilidad efectiva (μ_{ef}) es menor que la permeabilidad relativa teórica del material, como lo expresa la ecs. (2).

$$\mu_{ef} < \mu_r. \tag{2}$$

Para determinar μ_{ef} se utilizan los valores de inductancia medidos experimentalmente, esto se debe a la relación directa entre ambos parámetros. Se tienen los siguientes valores de inductancia:

$$L_{aire} = 1665\ \mu H, L_{núcleo} = 2.35\ mH.$$

La relación existente entre las inductancias y permeabilidades se expresa en la ecs. (3):

$$\frac{L_{núcleo}}{L_{aire}} = \frac{\mu_{ef}}{\mu_r}. \tag{3}$$

Como en el aire $\mu_r \approx 1$, se calcula la permeabilidad efectiva mediante la ecs. (4):

$$\mu_{ef} = \frac{L_{núcleo}}{L_{aire}} = 1.4114. \tag{4}$$

Por último, se sustituye μ_r por μ_{ef} en la ecs. (1) para obtener la densidad del flujo magnético real del sistema, como se muestra en la ecs. (5).

$$B = \mu_0 \mu_{ef} \frac{N}{L} I = 16.4181\ mT. \tag{5}$$

Con el objetivo de tener una operación también a 120 Hz, se incorpora un puente de diodos de onda completa, este duplica la frecuencia de la señal alterna aplicada. Para ellos se utilizan diodos 1N5401, adecuados para corrientes de hasta 3 A. La señal rectificada se verifica mediante un osciloscopio, este confirma la frecuencia de 120 Hz a la salida del puente, como se observa en la figura 3. De esta forma el electroimán puede trabajar tanto a 60 como a 120 Hz.

Al término del electroimán, se construye la estructura del sistema y el mecanismo giratorio para alojar las semillas durante el tratamiento presiembra. Dicha caja se construye con madera, material con propiedades no magnéticas, para evitar interferencias con el campo generado por el electroimán. En su interior se distribuyen los diversos subsistemas como el mecanismo giratorio, el encargado de energizar el sistema y de control.

Para garantizar una operación estable se calibra el sensor de corriente para asegurar precisión en las mediciones del motor de CD. Además, se implementa un controlador PID para regular la velocidad angular del eje, con el fin de mantener condiciones homogéneas durante el tratamiento.

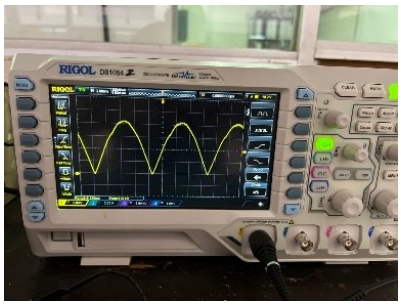


Figura 3. *Salida del puente de diodos de onda completa a 120 Hz.*

De forma complementaria, el diseño integra una pantalla LCD 16x2 con comunicación I2C, esta muestra el conteo regresivo del tiempo de exposición para facilitar la supervisión en tiempo real. La selección de

los intervalos se realiza mediante tres entradas digitales asociadas a los tiempos de 10, 30 y 60 minutos. Al concluir el conteo y el tratamiento, se activa una alarma acústica a través de un buzzer pasivo. Todo este proceso se lleva a cabo mediante un microcontrolador.

Al tener listo el sistema de generación de campo se aplican los tratamientos para las semillas ante un campo de 60 Hz y 120 Hz durante 5 días y se dividen en tiempos de T1 = 10 min, T2 = 30 min y T3 = 60 min. Cada tratamiento cuenta con tres repeticiones de 30 semillas, por lo que se tratan 270 semillas a 60 Hz y 270 a 120 Hz, para un total de 540. Además, se incluye un grupo control con 30 semillas sin tratamiento magnético.

Al concluir la estimulación, las semillas se colocan durante 24 horas en vasos y se vierte agua hasta la mitad con el propósito de ablanar la cubierta seminal y facilitar la germinación. Los recipientes se etiquetan por tratamiento, frecuencia, tiempo y repetición, esto se muestra en la figura 4.

Figura 4. *Vasos etiquetados con numero de tratamiento, repetición y frecuencia.*

Figura 5. *Charolas germinadoras con las semillas plantadas.*

Resultados

En la tabla 1 se presentan los datos registrados durante los primeros 17 días posteriores a la siembra de las semillas sometidas al tratamiento de 60 Hz. Se consideran como variables de interés el número de brotes y el porcentaje de germinación para cada tiempo de exposición. El porcentaje de germinación se calcula mediante la ecs. (4).

$$\%\ de\ germinación = \frac{P_G}{P_T}\ x\ 100 \qquad (4)$$

donde:

- P_G = Plantas que presentan una germinación.
- P_T = Plantas totales de cada tiempo (54).

Tabla 1. *Número de brotes y porcentaje de germinación del tratamiento de 60 Hz.*

Tratamiento	Aspecto de importancia	Día 2	Día 3	Día 6	Día 7	Día 10	Día 11	Día 16	Día 17
10 min	Cantidad de brotes	0	0	2	23	42	42	47	48
10 min	% de germinación	0%	0%	3.70%	42.59%	77.77%	77.77%	87.03%	88.88%
30 min	Cantidad de brotes	0	1	3	8	38	40	42	42
30 min	% de germinación	0%	1.85%	5.55%	14.81%	70.37%	74.07%	77.77%	77.77%
60 min	Cantidad de brotes	1	1	10	24	44	47	48	49
60 min	% de germinación	1.85%	1.85%	18.51%	44.44%	81.48%	87.03%	88.88%	90.74%
Grupo control	Cantidad de brotes	0	0	0	3	16	16	16	16
Grupo control	% de germinación	0	0	0	16.67%	88.89%	88.89%	88.89%	88.89%

En el grupo tratado a 60 Hz se observa un inicio de germinación temprano en comparación con el grupo del tratamiento de 120 Hz. Sin embargo, el método de 60 Hz alcanza un porcentaje máximo de germinación menor, con un valor de 90.74 % para el tiempo de exposición de 60 min. En contraste, el tratamiento a 120 Hz, donde sus resultados se presentan en la tabla 2, muestra un porcentaje máximo de germinación de 92.59 % para el tiempo de 10 min.

Por otra parte, el tratamiento de 120 Hz se identifica una disminución del porcentaje de germinación conforme aumenta el tiempo de exposición. Esta tendencia contrasta con la observación ante el método de 60 Hz, el cual mantiene porcentajes de germinación estables y favorables, en particular para los tiempos de 10 y 60 min.

Tabla 2. *Número de brotes y porcentaje de germinación del tratamiento de 120 Hz.*

Tratamiento	Aspecto de importancia	Día 6	Día 7	Día 10	Día 11	Día 16	Día 17
10 min	Cantidad de brotes	14	36	47	48	50	50
10 min	% de germinación	25%	66.66%	87.03%	88.88%	92.59%	92.59%
30 min	Cantidad de brotes	2	21	44	47	46	46
30 min	% de germinación	3.70%	38.88%	81%	87.03%	85.18%	85.18%
60 min	Cantidad de brotes	0	8	35	38	37	37
60 min	% de germinación	0%	14.81%	64.81%	70.37%	68.51%	68.51%
Grupo control	Cantidad de brotes	0	3	16	16	16	16
Grupo control	% de germinación	0	16.67%	88.89%	88.89%	88.89%	88.89%

La figura 6 muestra el porcentaje de germinación acumulado a lo largo del tiempo para los distintos tratamientos de frecuencia (60 y 120 Hz) y tiempos de exposición (10, 30 y 60 minutos). Se observa que la germinación inicia de forma notable a partir del día 7 y alcanza sus

valores máximos entre los días 10 y 17. El tratamiento de 10 min a 120 Hz presenta una germinación más rápida y el valor acumulado mayor, mientras que el grupo control y algunos tratamientos a 60 Hz registran porcentajes menores a lo largo del periodo evaluado.

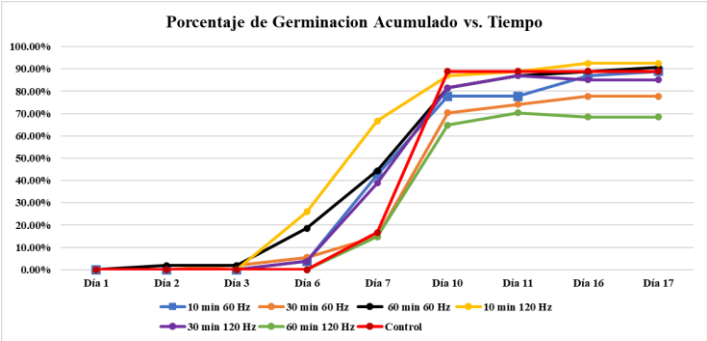


Figura 6. *Porcentaje de germinación acumulado para los distintos experimentos.*

En ambos tratamientos se observa una germinación temprana en comparación con el grupo control, el cual presenta brotes de manera tardía y con menor porcentaje de germinación al finalizar el periodo de observación. El estado final de las plántulas al día 17 se muestra en las figuras 7 y 8.

a) **b)** **c)**

Figura 7. *Plantas del tratamiento de 60 Hz. a) Tiempo de 10 min. b) Tiempo de 30 min. c) Tiempo de 60 min.*

Los resultados muestran que la exposición de semillas de *Capsicum annuum L.* a campos electromagnéticos variables incrementa tanto el porcentaje como la velocidad de la germinación, el mayor efecto se obtiene en la frecuencia de 120 Hz con tiempos cortos de tratamiento. En contraste, los tratamientos prolongados a 120 Hz no presentan el mismo comportamiento favorable. Estos hallazgos evidencian que la respuesta de la semilla depende de la combinación de frecuencia y tiempo de exposición.

a) **b)** **c)**

Figura 8. *Plantas del tratamiento de 120 Hz. a) Tiempo de 10 min. b) Tiempo de 30 min. c) Tiempo de 60 min.*

Conclusiones

El tratamiento de estimulación mediante campo electromagnético variable a 60 y 120 Hz demuestra una mejora en el proceso de germinación de semillas de chile serrano (*Capsicum Annuum L.*). Los resultados indican una reducción en el tiempo necesario para el inicio de la germinación y un incremento en la cantidad de semillas que germinan en comparación con el grupo control.

El tratamiento a 120 Hz con un tiempo de exposición de 10 minutos alcanza el mayor porcentaje de germinación, con un valor de 92.59 %. Por su parte, el tratamiento a 60 Hz presenta un comportamiento estable y favorable, este alcanza un porcentaje máximo de 90.74 % para un tiempo de exposición de 60 minutos. Estos resultados confirman que la aplicación controlada de campos electromagnéticos favorece la germinación y mejora la eficiencia del establecimiento inicial del cultivo.

De este modo, la implementación de un sistema de generación de campo electromagnético para la estimulación de semillas de chile serrano se presenta como una alternativa viable para acortar el tiempo y aumentar el porcentaje de germinación. No obstante, el presente estudio se centra en el análisis del desempeño fisiológico inicial, por este motivo, estos resultados constituyen evidencia experimental sólida sobre el efecto aplicado de los campos electromagnéticos en la germinación, aunque no permiten establecer de manera definitiva los mecanismos biofísicos involucrados. En trabajos futuros se propone

integrar mediciones fisiológicas y bioquímicas que permitan esclarecer el fenómeno y definir condiciones óptimas de aplicación en campo.

Referencias

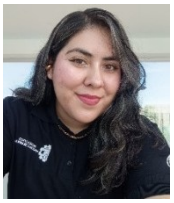
[1] Servicios de Información Agroalimentaria. (2024). Panorama agroalimentario la ruta de la transformación agroalimentaria 2018-2024. México: servicio de información agroalimentaria y pesquera.
[2] Bien informado. (22 de enero de 2024). La agricultura es pieza clave en la economia de Sinaloa. Bien informado, pág. 1.
[3] Servicios de Información Agroalimentaria. (2024). Panorama agroalimentario la ruta de la transformación agroalimentaria 2018-2024. México: servicio de información agroalimentaria y pesquera.
[4] Gobierno de Mexico. (2014). gob. Obtenido de gob: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/156538/Manejo_fitosanitario_del_chile.pdf
[5] Bloquet, S. (10 de Noviembre de 2019). ¿Qué es el electromagnetismo? Obtenido de Exem: www.exem.fr/es/que-es-un-campo-electromagnetico/#:~:text=El%20campo%20electromagn%C3%A9tico%20es%20una,expresa%20en%20voltios%20por%20metro.
[6] NAFSA, N. (19 de Marzo de 2024). ¿Que son los electroimanes? Obtenido de NAFSA: https://nafsa.es/que-son-los-electroimanes-y-como-funcionan/
[7] Zepeda Bautista, R., Virgen Vargas, J., Suazo López, F., Dominguez Pacheco, F. A., Rodríguez Rebollar, H., & Hernández Aguilar, C. (2019). Campo electromagnético en plántulas, rendimiento y calidad de maíz en condiciones de campo. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14.
[8] Carbonell Padrino, M. V., Martínez Ramírez, E., & Flórez García, M. (2013). Tratamiento magnético como técnica estimulante de la germinación de semillas de soja. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, 11.

Semblanza Autores

Cesar Gerardo Parra, Ingeniero en Electrónica (2023) y Maestro en Ciencias de la Ingeniería (2025) por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.

Ramos Rodríguez Eros Geovanni, estudiante de Ing. Eléctrica, Tecnológico Nacional De México, Campus Culiacán.

Romo Torres Rodrigo Alexis, estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica en el Tecnológico Nacional de México campus Culiacán.



Soto Vega Gloria Fernanda, estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica en el Tecnológico Nacional de México campus Culiacán.

David Enrique Castro Palazuelos, Ingeniero Electrónico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2000). Maestro en Ciencias en Telemática por la Universidad de Colima (2004) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialización en Telecomunicaciones por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Guadalajara (2015).

Julio Cesar Picos Ponce, Ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2003). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados, IPN, Unidad Guadalajara (2005). Doctor en Ciencias en Sistemas de Información por la Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Culiacán (2017).